



Sensibilité des sols forestiers de la région Centre Val de Loire à la récolte de bois énergie par arbres entiers

Isabelle Bilger, Nathalie Korboulewsky

► To cite this version:

Isabelle Bilger, Nathalie Korboulewsky. Sensibilité des sols forestiers de la région Centre Val de Loire à la récolte de bois énergie par arbres entiers. INRAE, EFNO, Nogent-sur-Vernisson. 2024, 22 p. hal-04505963

HAL Id: hal-04505963

<https://hal.inrae.fr/hal-04505963>

Submitted on 15 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



Sensibilité des sols forestiers de la région Centre Val de Loire à la récolte de bois énergie par arbres entiers

Isabelle BILGER - Nathalie KORBOULEWSKY

INRAE, EFNO, 45290 Nogent-sur-Vernisson, France.

Février 2024

Résumé :

Le bois énergie destiné à l’approvisionnement en plaquettes forestières des grosses chaufferies collectives et industrielles de la région Centre Val de Loire, provient généralement de coupes rases ou partielles exploitées par « arbre entier ». Ce mode de récolte largement répandu conduit à exporter une grande majorité des menus bois et souvent le feuillage risque d’affecter durablement la fertilité des sols forestiers déjà naturellement pauvres. Cette étude visait à explorer la question de l’impact de cette pratique sur les sols forestiers dans le contexte régional du Centre Val de Loire avec comme objectifs d’évaluer leur sensibilité en exploitant les résultats d’analyses de laboratoire déjà réalisées, d’évaluer la pertinence, pour une utilisation régionale, de l’indicateur de diagnostic de terrain INSENSE et d’un indicateur simplifié basé uniquement sur la texture des horizons superficiels, et de réaliser des cartes de sensibilité des sols forestiers à une échelle plus fine que la carte nationale. Nos résultats confirment que les sols forestiers de la région sont majoritairement fortement sensibles à l’export supplémentaire de nutriments occasionné par la récolte par arbre entiers. Selon le niveau de sensibilité référence basé sur les concentrations en N, P, K, Ca, Mg dans la couche de sol 0-10 cm, 48% des 412 profils pédologiques de la région sont fortement sensibles et seulement 16% le sont faiblement. La clef de diagnostic terrain mise au point dans le cadre du projet INSENSE ne semble pas totalement pertinente dans le contexte de la région car trop précautionneuse. L’indicateur simplifié SensiCVL conçu spécifiquement pour le contexte pédologique de la région CVL paraît davantage prometteur. Il fournit à partir d’un seul critère un diagnostic fiable dans 70% des profils pour les classes de sensibilité faible et forte et dans 49% des cas pour la classe de sensibilité intermédiaire. Une carte de sensibilité des sols de la région s’appuyant sur les unités cartographiques du Référentiel régional pédologique a pu être établie à partir de l’indicateur SensiCVL, sur quatre départements de la région. On retrouve que près de 50% de la surface forestière reposent sur des sols fortement sensibles mais atteint plus des deux tiers pour le Loiret. Une telle carte doit contribuer à faire prendre conscience que pour la moitié des peuplements forestiers de la région, voire plus des trois quart dans certaines sylvoécotons, la pratique de récolte de biomasse avec export des menus bois est fortement déconseillée du fait d’un risque très probable d’impacts sur la fertilité et le fonctionnement du sol.

Crédit photos page de couverture : 1 Nathalie Korboulesky, 2 et 4 Isabelle BILGER, 3 Camille Couteau



Sensibilité des sols forestiers de la région Centre Val de Loire à la récolte de bois énergie par arbres entiers

BILGER Isabelle* et KORBOULEWSKY Nathalie*

* INRAE, EFNO, F45290 Nogent-sur-Vernisson, France.

Introduction

Les multiples stratégies et plans d'action élaborés depuis vingt ans, à l'échelle européenne, nationale et territoriale, pour lutter contre les changements climatiques et promouvoir l'indépendance énergétique, misent tous sur une augmentation de la part des énergies renouvelables (ENR) dans le mix énergétique. Parmi les différents types d'énergie renouvelables, le bois énergie, occupe en France la première place avec 35% de la production totale d'ENR. Après le triplement entre 2005 et 2017 du volume de bois énergie commercialisé (De Ravignan *et al.*, 2021) suite au développement des chaufferies collectives et des centrales biomasse sous l'impulsion des appels d'offre biomasse de la Commission de la régulation de l'énergie (CRE) et de l'Ademe (Fonds Chaleur), le marché a eu tendance à stagner, avant d'enregistrer une reprise fin 2022 due à la crise énergétique. Les prévisions pour la prochaine décennie, tablent sur une progression soutenue de la demande en bois énergie en réponse aux incertitudes et tensions sur l'approvisionnement en énergies fossiles et aux incitations et obligations réglementaires associées à la stratégie nationale bas-carbone.

En Région Centre Val de Loire, on comptait en 2021 270 chaufferies collectives et industrielles consommant 760 000 t/an de bois soit près du double qu'en 2012 (128 chaudières pour 404 000 t/an, source Cap filière 2015-2018, révision à mi-parcours en 2016). Les objectifs affichés dans le dernier CAP filière Forêt Bois prévoient d'atteindre en 2027 340 chaufferies et une consommation de 850 000t/ha. Si l'utilisation du bois énergie en substitution aux sources d'énergies fossiles pour la production de chaleur s'avère une option inévitable et essentielle à court et moyen terme, son développement en région Centre Val de Loire comme au plan national, doit être raisonné aux regards des enjeux environnementaux et conditionné à une gestion forestière durable.

Une part importante du bois énergie produit et consommé en région Centre Val de Loire (CVL) est destinée à l'approvisionnement des grosses chaufferies collectives et industrielles sous forme de plaquettes forestières (Korboulewsky *et al.*, 2022). Ces plaquettes proviennent de coupes rases ou partielles, exploitées à l'aide de machines d'abattage permettant une productivité accrue et de meilleures conditions de travail aux professionnels du bucheronnage. Ces coupes concernent majoritairement des peuplements feuillus pour plus de 85% de la biomasse mobilisée en région CVL et sont réalisées selon un mode de récolte par « arbre entier », consistant à prélever en même temps les troncs, les houppiers et les petites tiges gênantes pour ensuite broyer la totalité de la partie aérienne.

En permettant la récolte rapide et facile de l'intégralité des tiges à couper, jusqu'aux branches les plus fines ce mode d'exploitation conduit à prélever la grande majorité des menus bois. D'après une étude menée dans le cadre du projet Défiforbois portant sur une dizaine de chantiers bois énergie de la région CVL, moins de 10% du volume des menus bois coupés sont laissés sur le parterre de coupe après débardage (Korboulewsky *et al.*, 2022). De plus, la prépondérance dans la région des sols forestiers à hydromorphie permanente ou temporaire impose de planifier les interventions en période de météo sèche, lorsque leur portance permet la circulation des machines, soit traditionnellement de début juin



à fin septembre, en pleine saison de végétation. Le taux d'exportation des feuilles dépend des essences et du délai entre l'abattage et le débardage mais des expériences *ex situ* ont montré qu'après un délai inférieur à 6 mois, moins de 50% de la masse foliaire serait restituée au sol à la fin du chantier. En conséquence, le volume total de litière (menu bois + feuilles) laissé au sol après coupe est significativement réduit. Or les menus bois et les feuilles sont, avec les racines fines, les parties des arbres les plus concentrées en nutriments. Les menus bois sont deux à trois fois plus riches en éléments nutritifs que le compartiment bois fort et les feuilles en contiennent jusqu'à sept fois plus, (Korboulewsky *et al.* 2020). Cet export supplémentaire d'éléments nutritifs par rapport à des coupes conventionnelles de bois d'œuvre ou bois d'industrie risque donc d'affecter durablement la fertilité du sol forestier.

L'impact de cet export accru sur le bilan du processus naturel de recyclage des éléments nutritifs après coupe sera d'autant plus important que le volume total de biomasse exportée à l'hectare (volume sur pied coupé et/ou intensité de prélèvement) est grand et que la réserve en nutriments du sol est faible. En effet dans un sol chimiquement pauvre, la fertilité chimique dépend en grande partie des flux d'éléments provenant du recyclage des matières organiques issues de la décomposition à court et moyen terme des litières. Par suite, l'exportation des menus bois et des branches fines sont autant de matière qui ne pourra pas se décomposer en forêt et ne pourra pas réalimenter le sol en nutriments.

Avant de faire le choix d'une récolte de bois énergie pour une coupe programmée sur une parcelle, il est donc fortement recommandé de procéder préalablement à un diagnostic de sensibilité à l'export de menus bois pour évaluer le risque d'impact sur la fertilité chimique du sol. A cet effet, un indicateur de sensibilité du sol à l'export supplémentaire de biomasse via la récolte des rémanents a été élaboré pour une échelle nationale dans le cadre du projet INSENSE (Durante *et al.*, 2019) afin de permettre aux gestionnaires forestiers de réaliser un pré-diagnostic à partir d'observations sur le terrain. Outre, la position géographique définie grossièrement par le rattachement à la Grande région écologique (GRECO) dans laquelle se situe la parcelle, cet indicateur est basé sur quatre paramètres du sol : humus, texture de la couche superficielle du sol, réaction d'effervescence et profondeur du sol. Une application numérique For-Eval a été développée pour faciliter l'appréciation des critères et l'obtention de la conclusion du diagnostic (INRAE et ONF, 2020).

Cet indicateur de sensibilité INSENSE peut également être utilisé à plus large échelle dans le cadre d'une planification des possibilités de mobilisation durable du bois énergie sur un territoire tel qu'une région, un département ou une sylvoécorégion. Les opérateurs forestiers qui ont testé l'outil de diagnostic INSENSE ont souligné l'intérêt de pouvoir établir des cartes de sensibilité afin de limiter les besoins de campagne de terrain pour réaliser des descriptions de sols (Augusto *et al.*, 2018). Une carte illustrant le niveau de sensibilité des sols à l'échelle de la France entière basé sur les données sol de l'IFN a ainsi été produite dans le cadre du projet INSENSE (Augusto *et al.*, 2018). D'après cette carte, on note une nette prépondérance des sols forestiers fortement sensibles à l'export accru de biomasse au niveau de la région Centre Val de Loire.

Face à ce constat et pour se conformer aux recommandations de l'ADEME issues du projet GERGOISE (Landmann *et al.*, 2018, Ademe, 2020), le prélèvement des menus bois a été écarté des objectifs de mobilisation du Plan régional de la Forêt et du Bois (Conseil régional CVL, 2019). Néanmoins, la pratique d'exploitation du bois énergie par arbre entier s'est largement répandue dans la région depuis 2005, en forêt privée comme dans certaines forêts publiques (Korboulewsky *et al.*, 2022) sans tenir compte de la fertilité des sols. C'est la raison pour laquelle nous avons entrepris d'explorer plus finement la question de la sensibilité des sols à l'export des menus bois en se focalisant sur le contexte forestier régional du Centre Val de Loire.



Ce travail a été initié en 2018 dans le cadre du projet DEFIFORBOIS (Korboulewsky *et al.*, 2020) et poursuivi en 2021 avec le stage de Master d'Angèle Déroutineau. Cette première phase d'exploration a permis d'identifier les paramètres à prendre en compte, de les confronter à des résultats d'analyse de laboratoire et de retenir la texture comme paramètre le plus discriminant. Il est alors apparu intéressant d'approfondir le sujet et de l'étendre à l'ensemble de la région Centre Val de Loire, en tirant parti d'un jeu de données plus complet constitué par Rock Ouimet, lors de son accueil dans l'unité EFNO financé par l'agence régionale Le Studium. L'intention de ce rapport est de rendre compte de ce nouvelle phase d'étude qui avait comme objectifs de i) évaluer la sensibilité des sols de la région CVL à partir d'un maximum de profils de sol comportant des analyses chimiques, ii) évaluer la pertinence d'un indicateur simplifié basé uniquement sur la texture des horizons superficiels iii) comparer cet indicateur simplifié avec l'indicateur de diagnostic de terrain INSENSE, et iv) réaliser des cartes de sensibilité des sols forestiers à une échelle plus fine que la carte nationale.

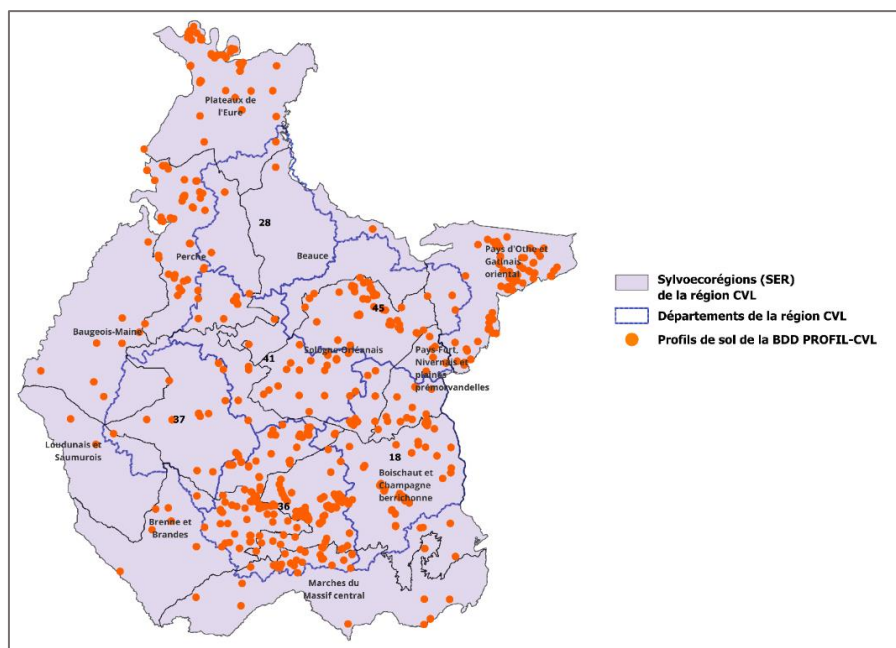
Matériel et méthodes

Données de caractérisation des sols forestiers

Pour mener cette étude nous avons cherché à rassembler des données concernant des points de sondage de sols situés sous forêt dans la région et comprenant à la fois des observations de terrain et des valeurs d'analyses physico-chimique de laboratoire. Pour disposer d'un maximum de données, la zone d'étude a été définie en incluant tous les points localisés dans l'une des 13 sylvoécorégions (SER) figurant partiellement ou entièrement en région CVL (Figure 1).

Pour cela nous avons utilisé la base de données constituée dans le cadre du projet INSENSE qui contient des données sur des sols forestiers issues de différentes sources (CoopEco, Ecoplant, GISCOOP, Donesol, Renecofor) en y ajoutant quelques données supplémentaires fournies par le GisCoop, la chambre d'agriculture de l'Indre (Référentiel Régional Pédologique) et EUROSTAT (base de données LUCAS). Toutes ces données ont été compilées dans une base de données (PROFIL-CVL) et pour chacun des points de sondage (Profil), les valeurs moyennes de granulométrie et de concentrations en éléments nutritifs ont été calculées sur la couche de sol de 0 à 10 cm de profondeur. Le jeu de données ainsi constitué contient 651 points de sondage, dont 412 situés dans la région et 239 situés dans des régions limitrophes mais inclus dans les SER représentées dans la région.





**Figure 1 : Localisation
651 points de sondages
du sol étudiés dans les
12 Sylvoécorégions
représentées en région
CVL**

Les variables retenues pour cette étude sont le type de texture, la teneur en N total, P total, Ca échangeable, Mg échangeable, K échangeable, la profondeur du sol et l'observation ou non d'une effervescence. Pour les profils où seules les valeurs de P assimilable étaient disponibles, les valeurs de P total ont été calculées en utilisant l'équation $P \text{ total} = 4290 * P \text{ assimilable} + 4^{-07}$.

Pour réaliser la cartographie de la sensibilité des sols de la région CVL à l'export accru de biomasse nous nous sommes appuyés sur les cartes au 1/250 000e du Référentiel Régional Pédologique (RRP) réalisées par les pédologues des Chambres d'Agriculture départementales de la région (Richer de Forges A. *et al*, 2014) avec l'appui du service INRAE Infosol. Cette échelle cartographique (1/250 000e) du RRP est bien adaptée à des besoins d'aménagement aux niveaux départemental et régional, telle que notre étude, mais n'est pas assez précise pour un diagnostic à l'échelle d'une parcelle. Pour cette étude nous avons pu avoir accès aux cartes RRP et aux bases de données associées pour quatre des six départements de la région, à savoir le Cher, l'Indre, l'Indre et Loire et le Loiret. Les polygones représentés dans ces cartes correspondent à des pédopaysages ou Unités Cartographiques de Sol (Ucs). L'unité minimale de cartographie des Ucs est de 50 hectares. Des cartes plus précises au 1/50 000 du RRP existent pour certains départements mais les résultats d'analyses de laboratoire associés ne sont pas disponibles. Chaque Ucs est définie à partir du regroupement de plusieurs types de sols ou Unités Typologiques de Sol (Uts). Les bases de données fournissent des informations qualitatives et quantitatives relatives à chacune des Ucs et Uts (Richer de Forges A., 2008). Pour les Uts, on dispose ainsi de nombreuses variables descriptives concernant des observations de terrain (profondeur, effervescence, humus, ...) et des résultats d'analyse de laboratoire obtenus à partir des différents points de sondage dans lesquels l'Uts a été décrite. Pour notre étude, nous avons sélectionné la ou les strates correspondant à la profondeur 0-10 cm (généralement seulement la strate 1) et considéré les paramètres « texture principale » et la « concentration des 4 éléments N, Mg, K, Ca » pour la ou les strates retenues. Par contre la concentration en P, également incluse pour l'estimation de l'indicateur INSENSE, n'a pu être prise en compte car elle ne figure pas dans la base de données Donesol du RRP.

Méthodes

Détermination des concentrations en éléments nutritifs et de la classe texturale sur la couche 0-10 cm :

Pour les 651 points de sondage (Profil), les teneurs moyennes sur l'ensemble de la couche de sol de profondeurs 0-10 cm pour le pourcentage de sable, argile et limon et la concentration de chaque nutriment ont été calculées à partir d'un découpage par tranche de 1 cm grâce au package MSpline. Pour les profils ayant une ou plusieurs données manquantes, le package R missMDA a été mis en œuvre au préalable pour estimer les valeurs absentes. La classe texturale selon le triangle de l'Aisne (15 classes) (Richer de Forges *et al.*, 2008) a également été déterminée sur la couche 0-10 cm à partir des valeurs de granulométrie en utilisant le package « soiltexture » de R (fonction `TT.points.in.classes`).

Calcul d'une note de sensibilité chimique combinée SensiChimi à partir des concentrations en éléments

Cette note représente la sensibilité de référence puisqu'elle est issue d'analyses de sols réalisées en laboratoire. Pour chacun des 651 profils, la concentration de chaque élément nutritif a été comparée à la valeur seuil des 3 classes de sensibilité définie par Durante et al (Tableau 1) et une note de 0 à 1 a été attribuée pour chacun des éléments (0 = classe faible, 0,5 = sensibilité moyenne, 1 = sensibilité forte). Cette note est nommée « **sensibilité élémentaire** ». Afin d'avoir une note englobant l'ensemble des 5 éléments, dite Note globale de sensibilité, une moyenne de la note de sensibilité élémentaire des 5 éléments est calculée, et correspond à une sensibilité : Faible $<0.25 = 0$ à 0,2, Moyen = 0,25 à 0,7, Fort $>0.75 = 0,8$ à 1 (Tableau 2).

Tableau 1 : Seuils de classe de sensibilité par éléments nutritifs selon Durante et al 2019 et note de sensibilité par élément et global

Elément	Unité	Sensibilité forte	Sensibilité moyenne	Sensibilité faible
Ca échangeable	cmol+/Kg	$<1,5$	$1,5 \leq x \leq 10$	>10
Mg échangeable	cmol+/Kg	$<0,46$	$0,46 \leq x \leq 1$	>1
K échangeable	cmol+/Kg	$<0,24$	$0,24 \leq x \leq 0,35$	$>0,35$
P total	mg/Kg	<100	$100 \leq x \leq 200$	>200
N total	g/Kg	$<1,47$	$1,47 \leq x \leq 2,85$	$>2,85$
Note Sensibilité élémentaire		1	0,5	0
Note globale de sensibilité SensiChimi		$> 0,75$ = 3	0,3 à 0,7 = 2	$<0,25$ =>1

Calcul de l'indicateur de diagnostic terrain SensiInsense

Pour chaque profil, le niveau de l'indicateur de sensibilité Insense (SensiInsense) a été déterminé à partir de la clef de diagnostic tenant compte des 5 paramètres suivants : Greco, forme d'humus, texture 0-10 cm (5 classes basées adaptées à partir des triangles de l'Aisne et de la FAO), profondeur prospectable ($<$ ou $\geq$ 25 cm), profondeur d'effervescence traduisant la présence de calcaire actif ($<$ ou $\geq$ 25 cm). Pour 551 profils, cet indicateur SensiInsense a pu être défini conformément à la procédure établie par les auteurs (Augusto *et al.* 2018). Pour les 100 autres profils, il n'a pas été possible de conclure, soit parce que le résultat était « indéterminé » du fait de sensibilités élémentaires

trop divergentes (pour 20 profils), soit parce que le type d'humus n'était pas renseigné (pour 80 autres profils).

Pour la majorité des analyses nous avons regroupés les 100 profils indéterminés en les considérant à part. Mais pour un test nous avons procédé selon quatre stratégies différentes: (i) soit affecter une note distincte des autres (5) aux 100 profils indéterminés, (ii) soit affecter une note moyenne (2) pour les 80 points avec résultat « indéterminé » pour SensiSense et une note distincte (5) pour ceux sans indication sur l'humus, (iii) soit affecter une note moyenne (2) pour les 100 données, (iv) soit exclure la totalité des 100 profils.

Validation de l'indicateur simplifié selon la texture (SensiCVL)

Pour valider l'idée d'un indicateur de sensibilité SensiCVL adapté au contexte de la région Centre basé sur un seul critère, la texture de la couche 0-10 cm, il nous fallait vérifier la classification des niveaux de sensibilité pour chaque classe de texture sur les 651 profils de l'étude. Pour cela, nous avons analysé la distribution de la note de sensibilité globale (valeur moyenne des cinq sensibilités élémentaires) selon la classe texturale du triangle de texture de l'Aisne à 15 classes de la couche de sol 0-10 cm. Puis le niveau de sensibilité SensiCVL de chaque texture a été défini selon les mêmes seuils que pour SensiChimi (faible ou niveau 1 < 0.25 ; moyen ou niveau 2 = $0,25$ à $0,7$; fort ou niveau 3 > 0.75).

Comparaison des deux indicateurs de terrain SensiSense et SensiCVL par rapport à l'indicateur de référence SensiChimi:

Les niveaux de sensibilité obtenus avec les indicateurs SensiSense et SensiCVL ont été comparés pour les 651 profils aux niveaux de sensibilité obtenus avec l'indicateur la référence SensiChimi à l'aide du test de concordance de rang de Kendall. La concordance de Kendal (W de Kendall) permet tester l'importance de concordance/discordance entre deux jeux de données. La statistique W s'étend de 0 à 1, et plus elle s'approche de 1 plus la concordance est forte.

Tableau 2 : Caractéristiques des différents indicateurs

Indicateur de sensibilité	Données source	Valeurs
Sensibilité élémentaire	Résultats analyses chimiques des sols (0-10 cm) pour N, P, K, Mg et Ca issues des projets Insensé et autres BDD => données référence dans BDD Profil-CVL	0 - 0,5 - 1
SensiChimi	sensibilité globale = moyenne des sensibilité élémentaires	faible ($> 0,25$) - moyenne ($0,25$ à $0,75$) - forte ($> 0,75$)
SensiSense	Description des profils de sols (humus, granulométrie, profondeur des strates) dans BDD Profil-CVL	faible - moyenne - forte - indéterminée
SensiCVL	Analyses granulométrique dans la BDD Profil-CVL	faible - moyenne - forte

Cartes de sensibilité des sols basé sur les 651 points de la base de données Profil-CVL

La localisation des 651 profils de la base de données Profil-CVL a été reportée sur une carte de la région afin de visualiser, sur une première carte, le niveau de la sensibilité de référence SensiChimi. Sur une



seconde carte, le niveau de sensibilité de l'indicateur simplifié SensiCVL basé sur la texture et la note SensiChimi ont été superposés en chacun des points.

Carte de sensibilité par Unité cartographique (Ucs) du Référentiel Régional Pédologique au 1/250 000ème

Une première étape a consisté, pour chaque unité typologique de sol (Uts), à sélectionner la ou les strates correspondant à la profondeur de sol 0-10 cm, et à définir le niveau de sensibilité SensiCVL selon la texture de la ou les strates considérées. Dans le cas où la couche de sol de profondeur 0-10 correspondait à plusieurs strates superposées ayant des niveaux de sensibilité différents, c'est le niveau de la strate la plus épaisse qui a été retenue. Dans un second temps, une note de sensibilité compensée par Ucs a été calculée en tenant compte du pourcentage en surface de chaque Uts au sein de l'Ucs. Puis les Ucs ont été redécoupées en se basant sur la carte de la BD Forêt V2 de l'IGN pour ne retenir que les zones correspondant à des forêts.

Résultats et discussion

Répartition des niveaux de sensibilité de la référence SensiChimi sur l'ensemble des 651 profils de la zone d'étude et les 551 profils de la région CVL

La sensibilité SensiChimi, basée sur les teneurs de cinq nutriments à partir d'analyses de laboratoire et comparées à des seuils de sensibilité constituée, d'après *Durante et al.*, la meilleure référence pour évaluer la richesse des sols et donc le risque d'impact négatif sur la fertilité d'une exploitation par arbre entier. Selon SensiChimi, 43% des 651 sols étudiés ont une sensibilité forte et 17% une sensibilité faible (Tableau 3). Si l'on se focalise sur les 412 profils inclus dans le périmètre de la région, les pourcentages ne sont pas significativement différents (Test Chi2 de bonne adéquation $p=2.1 \cdot 10^{-20}$), même si on observe en région CVL une tendance à une plus forte proportion de sols de sensibilité forte (48%) aux dépens des sols de sensibilité moyenne (36% au lieu de 41%).

Tableau 3 : Distribution des niveaux de sensibilité SensiChimi pour les 651 profils de la zone d'étude (13 sylvoécorégions (SER)) et le sous-échantillon des 412 localisés en région CVL

Niveau sensibilité référence SensiChimi	Zone étude		Région CVL	
	Nombre de profils	%	Nombre de profils	%
faible	109	17%	65	16%
moyenne	264	41%	150	36%
forte	278	43%	197	48%

En analysant les niveaux de sensibilité par élément définis en comparant les concentrations par rapport aux seuils de sensibilité de *Durante et al.*, on voit que moins de 21% des sols ont une sensibilité faible pour l'ensemble des éléments et que le niveau de sensibilité fort concerne essentiellement K, Mg et dans une moindre mesure Ca (Tableau 4).

Tableau 4 : Niveaux de sensibilité par éléments sur les 412 profils de la région CVL

Sensibilité élémentaire	Ca	K	Mg	P	N
faible	17%	19%	21%	20%	17%
moyenne	33%	17%	20%	47%	39%
forte	50%	65%	59%	33%	44%

Niveaux de sensibilité selon l'indicateur de diagnostic terrain **Sensilnsense** sur l'ensemble des 651 profils de la zone d'étude et les 551 profils de la région CVL

D'après l'indicateur Sensilnsense, 68% des sols ont une sensibilité forte et environ 10% ont une sensibilité faible aussi bien sur les 651 profils de la zone d'étude couvrant l'intégralité des 13 SER que sur le sous échantillon des 412 profils de la région (Tableau 5). Pour la classe de sensibilité moyenne on note une différence entre ces deux zones. Ils représentent 8% dans la zone d'étude élargie et seulement 3% en région CVL car la proportion de profils avec un type d'humus non renseigné y est plus importante (15% contre 12%).

Tableau 5: Distribution des niveaux de l'indicateur Sensilnsense pour les 651 profils de la zone d'étude (13 sylvoécorégions (SER)) et le sous-échantillon des 412 localisés en région CVL

Niveau sensibilité indicateur Sensilnsense	Zone étude		Région CVL	
	Nombre de profils	%	Nombre de profils	%
faible	58	9%	42	10%
moyenne	49	8%	14	3%
forte	444	68%	281	68%
Indéterm_Pas Humus	80	12%	61	15%
Indéterminée	20	3%	14	3%

Niveaux de sensibilité SensiChimi selon la texture de la couche de sol 0-10 cm et validation de l'indicateur SensiCVL

Sur l'ensemble des 651 profils, chaque classe texturale du triangle de l'Aisne (15 classes) étaient représentées en moyenne par plus de 40 points de sondage, sauf pour la texture LL que nous avons écartée (un seul point) (Tableau 6).

Tableau 6: Nombre de points de sondage et valeurs médiane de la note de sensibilité globale (moyenne des 5 note de sensibilité élémentaire) pour les 15 textures du triangle de l'Aisne.

Nb pts de sondage	A	AL	ALO	AS	LA	LAS	LSA	LL	LM	SA	LMS	LLS	LS	SL	S
Mediane de la moyenne des 5 sensibilités élémentaires	26	10	39	4	18	46	35	1	41	42	76	7	106	124	76
	0.2	0.1	0.1	0.25	0.4	0.4	0.4	0	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.9	0.95

La figure 2 montre la distribution de la note globale de sensibilité SensiChimi (moyenne des 5 notes élémentaires) pour chacune des classes. On voit que pour trois textures (A, AL et ALO) la sensibilité globale est inférieure ou égale à 0,2 et que pour trois autres 3 textures (LS, SL et S) elle est supérieure ou égale 0,8. D'après les valeurs seuils définies par Durante et al 2019 ($<0,25$ et $>0,75$), le premier groupe de texture correspond à une sensibilité faible et le second à une sensibilité forte.

Pour les autres textures, la sensibilité globale varie entre 0,25 et 0,7. Ceci nous a permis d'établir un classement en affectant un niveau SensiCVL pour 14 textures alors que l'ordre du travail exploratoire nous n'avions pas pu conclure pour certaines textures qui n'étaient pas représentées dans le jeu de données (Tableau 7).

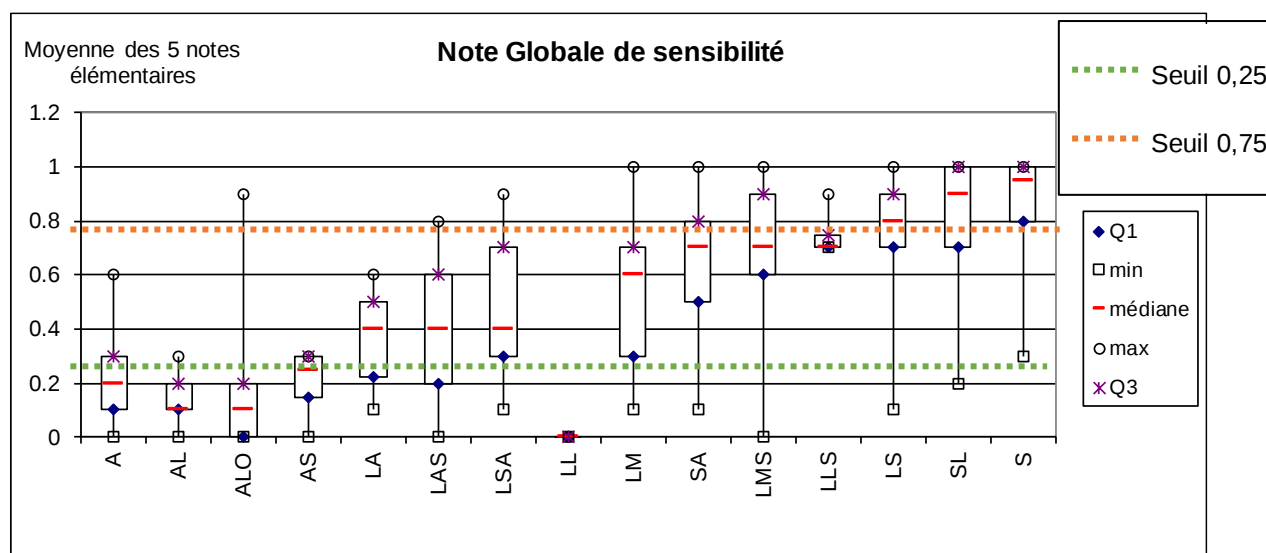


Figure 2 : moyenne des 5 notes de sensibilité élémentaire pour les 651 points étudiés

Tableau 7 : Valeurs de l'indicateur SensiCVL selon la classe texturale de l'Aisne sur la profondeur du sol 0-10 cm (pour 14 des 15 textures)

Classes de texture de l'Aisne	Moyenne des 5 notes de sensibilités élémentaire	SensiCVL
A, ALO, AL	<0,25	faible
AS, LA, LAS, LSA	0,25 - 0,4	moyenne
LM, SA, LMS, LLS	0,6 - 0,7	
S, SL, LS	>0,75	forte

D'après cet indicateur SensiCVL, 47% des sols ont une sensibilité forte et 41% ont une sensibilité moyenne sur les 651 profils de la zone d'étude. Pour les points localisés strictement en région CVL, la proportion de sols fortement sensibles dépasse même 50% alors qu'un tiers des sols sont dans la catégorie moyennement sensible (Tableau8).

Tableau 8 : Distribution des niveaux de l'indicateur de sensibilité SensiCVL pour les 651 profils de la zone d'étude (13 sylvoécórégions (SER)) et le sous-échantillon des 412 localisés en région CVL

Niveau sensibilité indicateur SensiCVL	Zone étude		Région CVL	
	Nombre de profils	%	Nombre de profils	%
faible	75	12%	58	14%
moyenne	270	41%	134	33%
forte	306	47%	220	53%

Comparaison des niveaux de sensibilité fournis par les indicateurs SensiSense et SensiCVL par rapport à la référence SensiChimi

Pour rappel, les indicateurs SensiSense (Durante *et al.*, 2019) et SensiCVL ont été élaborés pour permettre un diagnostic à partir de données issues d'observations de terrain à défaut d'une analyse de laboratoire. Ils sont comparés ici avec l'indicateur SensiChimi servant de référence. D'après l'indicateur SensiSense, si l'on exclut les 100 profils pour lesquels l'indicateur combiné ne permet pas de conclure, 81% ont une sensibilité forte et 11% une sensibilité faible. Par contre, selon l'indicateur SensiCVL basé sur la texture, 47% des 651 sols ont une sensibilité forte, 12% une sensibilité faible et 41% une sensibilité moyenne ou indéterminée (Tableau 9).

Si l'on considère globalement les données, l'indicateur SensiSense apparaît donc beaucoup plus précautionneux que la référence SensiChimi aussi bien sur la région CVL que sur la zone d'étude élargie à l'ensemble des 13 SER de la région. Quant à l'indicateur SensiCVL, il donne dans les deux cas un diagnostic plus proche de celui de la référence SensiChimi bien que légèrement plus sévère.

Tableau 9 : Distribution des niveaux de sensibilité pour les 651 profils de la zone d'étude (13 sylvoécórégions (SER)) et le sous-échantillon des 412 localisés en région CVL

Indicateur	Niveaux de sensibilité	Zone étude			Région CVL		
		Nombre de profils		%	Nombre de profils		%
SensiChimi	faible	109		17%	65		16%
	moyenne	264		41%	150		36%
	forte	278		43%	197		48%
SensiInsense	faible		58	11%		42	12%
	moyenne		49	9%		14	4%
	forte		444	81%		281	83%
SensiCVL	faible	75		12%	58		14%
	moyenne	270		41%	134		33%
	forte	306		47%	220		53%
Nb total de profils par indicateur		651	551		651	551	

La cohérence entre les résultats fournis respectivement par les deux indicateurs SensiInsense et SensiCVL et la sensibilité de référence SensiChimi, a été vérifiée en réalisant un test de concordance de Kendall. Ce test a dans un premier temps été appliqué sur le jeu de données complet (651 profils des 13 SER) puis sur le sous échantillons des profils situés en région CVL (Tableau 10).

Tableau 10 : Résultats du test de concordance de Kendall concernant les relations entre la sensibilité référence SensiChimi et les indicateurs SensiCVL et SensiInsense

	SensiInsense/SensiChimi						SensiCVL/SensiChimi	
	SERs				Région CVL		SERs	Région CVL
	avec indéterminés stratégie i (=5)	avec indéterminés stratégie ii (=2 et 5)	avec indéterminés stratégie ii (=2)	sans indéterminés stratégie iv	avec indéterminés stratégie i (=5)	sans indéterminés stratégie iv		
Nb de profils	651	651	651	551	412	337	651	412
Kendall's W	0.6312	0.6621	0.6934	0.7786	0.5945	0.7849	0.8011	0.7973
p-value	0.001996	0.0001	0.0001	0.001996	0.001996	0.00199	0.001	0.001

Niveau de sensibilité SensiInsense par rapport au niveau référence SensiChimi par profil

Selon le résultat du test de concordance de Kendal (Tableau 10), l'indicateur SensiInsense est corrélé à la sensibilité référence SensiChimi (coeff. Kendall's W=0.63, p-value=0.002 pour la stratégie i). La relation est encore plus nette si on exclut les 15% de cas où l'indicateur SensiInsense ne permet pas de conclure du fait d'une sensibilité combinée indéterminée (coeff Kendall's W=0.78, p-value=0.002 pour la stratégie iv).

L'indicateur SensiInsense fournit la bonne conclusion dans 51% des cas (Tableau 11, cases vertes). Il est plus sévère que SensiChimi dans 32% des cas (cases orange claires et foncées), avec un écart d'un niveau pour 28% des profils et de deux niveaux pour 4%. Par contre il ne sous-estime le risque que dans 1,5% des cas et d'un seul niveau (cases jaunes).

Tableau 11 : Distribution du nombre de profils (en %) selon la sensibilité référence SensiChimi et l'indicateur SensiInsense sur l'ensemble des 651 profils de la zone d'étude



SensiInsense	SensiChimi			Total
	faible	moyenne	forte	
faible	8%	1%	0.0%	9%
moyenne	2%	5%	0.5%	8%
forte	4%	26%	38%	68%
indéterminée	3%	8%	4%	15%
Total	17%	41%	43%	100%

Niveau de sensibilité SensiCVL par rapport au niveau référence SensiChimi par profil

D'après le test de concordance de Kendal (Tableau 10), l'indicateur SensiCVL apparait bien corrélé à la sensibilité référence SensiChimi aussi bien pour les 651 profils des 13 SER que pour le sous échantillon des 412 profils de la région CVL (coeff Kendall's W=0.8, p-value=0.001).

Dans 66% des 651 profils, l'indicateurs attribuent le bon niveau de sensibilité (Tableau 12, cases vertes). L'indicateur SensiCVL est plus sévère d'un niveau dans 21% des cas (cases orange claires) et de deux niveaux dans seulement 1% des cas (7 cas, case orange foncé). Il n'est par contre pas assez sévère d'un niveau pour 12% des profils (cases jaune pâle). Dans un seul cas (0,2%) il sous-estime le risque de deux niveaux (faux négatif, case jaune foncé).

Tableau 12 : Distribution du nombre de profils (en %) selon la sensibilité référence SensiChimi et l'indicateur SensiCVL sur l'ensemble des 651 profils de la zone d'étude

SensiCVL	SensiChimi			Total
	faible	moyenne	forte	
faible	9%	2%	0.2%	12%
moyenne	7%	25%	10%	41%
forte	1%	14%	32%	47%
Total	17%	41%	43%	100%

Comparaison des indicateurs SensiInsense et SensiCVL par rapport à SensiChimi par niveau de sensibilité

Si l'on analyse plus précisément la cohérence entre chacun des indicateurs et la référence SensiChimi par niveau de sensibilité, pour les 412 profils de la région CVL (Tableaux 13 et 14) on voit que SensiInsense indique le niveau fort de référence dans 89% des cas et SensiCVL dans 78% de cas. Le niveau faible de référence est bien indiqué dans 68% des cas par SensiCVL et 55% par SensiInsense. Pour le niveau intermédiaire (moyen) SensiCVL se trompe une fois sur 2 (51%) car il surestime la sensibilité dans 42% des cas et la sous-estime dans 9%. SensiInsense est encore moins fiable pour le niveau moyen car il ne donne le bon résultat que dans 4% des cas. C'est donc pour ce niveau de sensibilité que le diagnostic est le plus incertain. Or il correspond à 30 à 40% des points de sondage de la région CVL.

Tableau 13 : Distribution du nombre de profil par niveau de l'indicateur SensiInsense pour les 412 profils de la région CVL

		SensiChimi		
		faible	moyenne	forte
SensiSense (Région CVL - 412 profils)	faible	55%	4%	0%
	moyenne	9%	4%	1%
	forte	15%	64%	89%
	indéterminée	20%	28%	10%
Total		100%	100%	100%

Tableau 14 : Distribution du nombre de profil par niveau de l'indicateur SensiCVL pour les 412 profils de la région CVL

		SensiChimi		
		faible	moyenne	forte
SensiCVL (Région CVL - 412 profils)	faible	68%	9%	1%
	moyenne	26%	49%	22%
	forte	6%	42%	78%
	Total	100%	100%	100%

Analyses des cas divergents entre SensiCVL et SensiChimi

*Types de sols et d'humus pour les cas divergents de **deux niveaux***

Les sept cas pour lesquels SensiCVL surestime de deux niveaux correspondent à des situations diverses et contrastées. La texture est SL (4 cas) ou LS (3 cas) mais 4 sont des Cambisols dont 2 avec présence de calcaire actif et 2 des Podzols. Les humus varient de type mull à mor.

Le seul cas où SensiCVL sous-estime de deux niveaux est un sol de type Planosol hydromorphe à texture Argile lourde, avec un humus de type Eumoder et un pH=4, situé sous un peuplement de conifère. SensiCVL attribue une sensibilité faible en se basant sur la présence d'une texture Argile lourde. La prise en compte de l'humus en plus de la texture devrait logiquement permettre de corriger ce diagnostic mais l'indicateur SensiSense fournit dans ce cas précis un résultat « indéterminé ».

*Textures de sols pour lesquelles l'indicateur SensiCVL surestime le risque d'un **niveau***

Globalement, les cas où l'indicateur SensiCVL est plus sévère d'un niveau que SensiChimi sont essentiellement les profils de texture LS, SL, LAS et S (75% des cas). Pour les sols de texture LAS, SensiCVL attribue une sensibilité moyenne ou indéterminée, alors que 33% des profils ont un niveau faible selon l'indicateur SensiChimi. Pour les trois autres textures, l'indicateur SensiCVL considère systématiquement les sols fortement sensibles alors qu'ils ont un niveau de sensibilité moyen selon la référence SensiChimi dans 20 à 40% des cas. Du point de vue d'un gestionnaire qui envisage une coupe de bois énergie, ce sont les sols de texture LAS qui posent le plus problème car cette classe est difficile à estimer sur le terrain et une récolte massive des menus bois sera déconseillée alors que certains sols pourraient la supporter. Cependant, d'après notre jeu de données, seulement 6 % des sols de la région CVL ont effectivement une texture LAS.

*Textures de sols pour lesquelles l'indicateur SensiCVL sous-estime le risque d'un **niveau**.*

L'indicateur SensiCVL est moins sévère que la référence SensiChimi pour les sols des textures LMS, SA, LM et A (77% des cas). Pour les trois premiers cas, les sols sont de sensibilité moyenne ou indéterminée selon SensiCVL alors qu'ils sont fortement sensibles pour SensiChimi (respectivement 22 à 42% des profils de chacune de ces textures). De même 35% des sols de texture argileuse, classés faiblement sensibles selon SensiCVL, sont en fait moyennement sensibles pour SensiChimi. Du point de vue de la préservation des sols, ce sont donc ces quatre types de texture qui posent problème car pour un tiers des cas le diagnostic permet une récolte partielle des menus bois alors que celle-ci devrait être totalement exclue.

Carte de localisation des profils étudiés avec leurs niveaux de sensibilité pour la référence SensiChimi et l'indicateur SensiCVL

Le niveau de sensibilité pour chacun des 651 points situés dans les 12 SER de la région CVL est présenté en figure 2 pour la référence SensiChimi. La figure 3 montre en plus les niveaux de sensibilité pour l'indicateur SensiCVL (texture) pour chaque point. On note que les sols de forte sensibilité sont concentrés dans la partie centrale de la région, dans les départements 45, 41 et 36 et dans les sylvoécorégions B70 et B82 et B91 et B61.

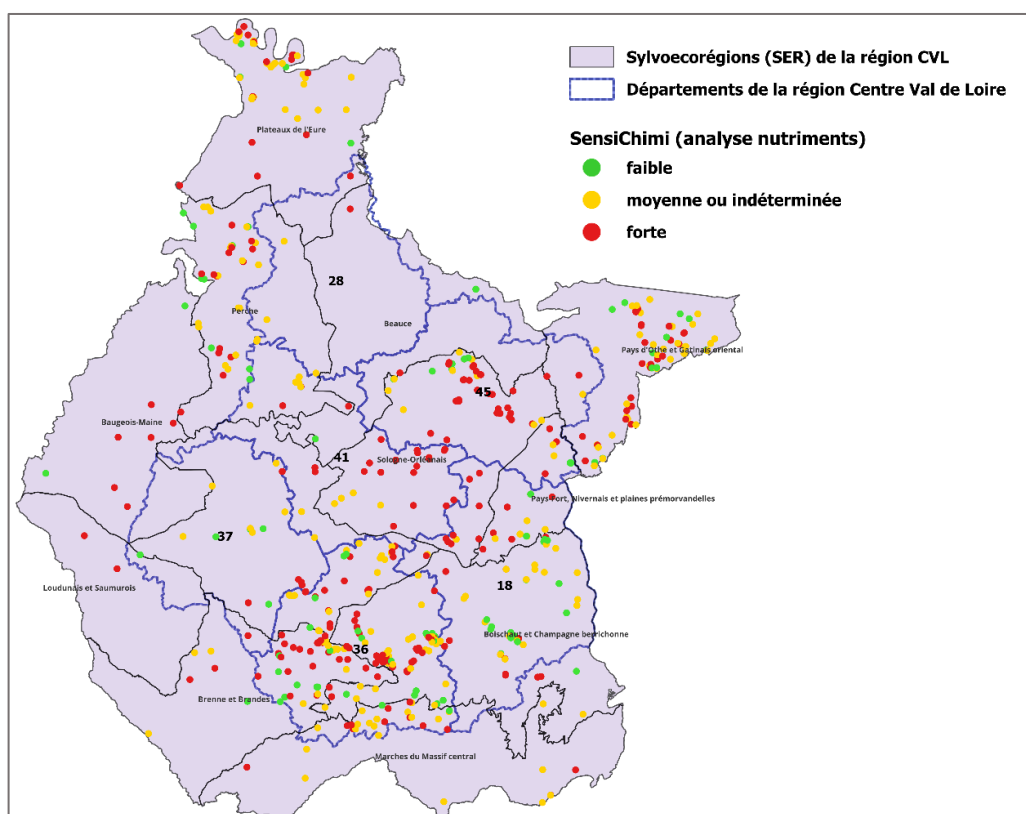


Figure 2 :
Niveau de sensibilité pour les 651 points étudiés selon l'indicateur SensiChimi (nutriments)

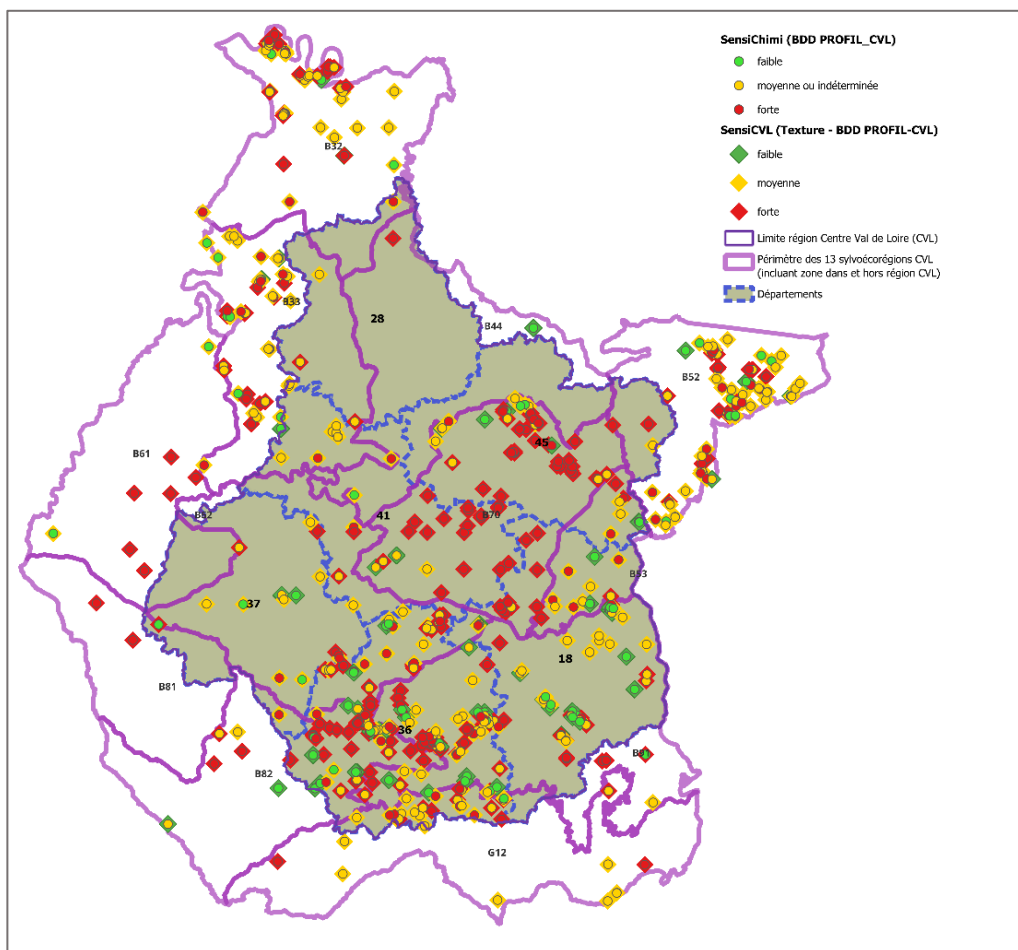


Figure 3 :
Niveau de
sensibilité
pour les 651
points selon
les
indicateurs
SensiCVL et
SensiChimi

Carte des niveaux de sensibilité des zones forestières basée sur les Unité cartographique (Ucs) du Référentiel Régional Pédologique

A partir des caractéristiques des unités de types de sols (Uts) représentées dans les différentes unités cartographiques (Ucs) du Référentiel régional pédologique au 1/250000 des départements du Cher, de l'Indre, de l'Indre et Loire et du Loiret, une carte de sensibilité a été réalisée sur l'ensemble des 4 départements (figure 4). Nous rappelons ici que le niveau de sensibilité compensé établi pour une Uc donnée correspond à l'indicateur SensiCVL pour chacune des Uts présentes dans cette Uc en tenant compte de l'importance en surface des différentes Uts.

D'après cette carte régionale partielle, les Ucs ayant un niveau de sensibilité fort couvrent 48% de la surface forestière des 4 départements, les Ucs de sensibilité moyenne (ou indéterminée) 41% tandis que 11% seulement de la surface a une sensibilité faible (Tableau 15). On constate que l'on retrouve à partir d'une source d'information différente, même si partiellement redondante, et de données de nature différentes (surface des ucs au lieu de nombre de profils décrits), approximativement la même proportion de sensibilité forte que celle obtenue à partir des 412 profils de la région CVL utilisés pour l'analyse précédente (tableau 9). C'est dans le Loiret que la proportion de sols fortement sensibles est la plus importante (68%). A l'opposé, dans le Cher, 21% des unités paysagères forestières reposent sur des sols faiblement sensibles. De même on note une différence notable entre les dix sylvoécorégions (SER) présentes dans ces 4 départements. Les SER B81, B70 et B61 sont celles qui détiennent la plus forte proportion de sols fortement sensibles avec respectivement 63%, 82% et 86% de leur surface classée en sensibilité forte (Tableau 16).

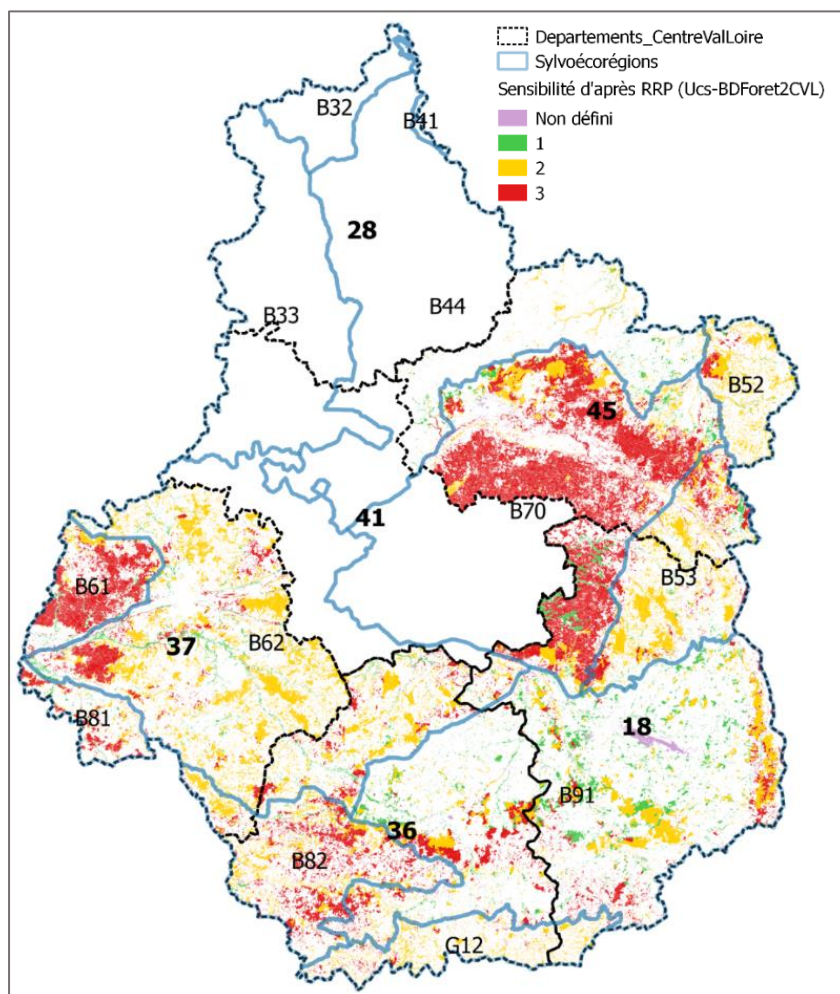


Figure 4 : Niveau de sensibilité des Unités cartographiques de sols (Ucs) représentées sous les forêts pour les départements 18, 36, 37 et 45.

Tableau 15 : Répartition des surfaces forestières par niveau de sensibilité dans chaque département

		Cher	Indre	Indre-et-Loire	Loiret	Départements 18-36-37-45
% surface forestière		26%	20%	24%	30%	100%
Niveau de sensibilité des Ucs (SensicVL Uts compilé)	Faible	21%	10%	7%	5%	11%
	Moyenne ou Indéterminée	40%	47%	54%	27%	41%
	Forte	39%	43%	39%	68%	48%

Tableau 16 : Répartition des surfaces forestières par niveau de sensibilité dans chaque sylvoécotégion (SER)

	% surface forestière sur la région	% surface forestière sur les 4 départements	Niveau de SensiCVL compilé par Ucs		
			Faible	Moyenne ou Indéterminée	Forte
B44	3%	1%	34%	57%	9%
B52	2%	3%	3%	80%	17%
B53	6%	8%	6%	68%	27%
B61	4%	6%	4%	10%	86%
B62	18%	21%	9%	69%	23%
B70	38%	31%	5%	13%	82%
B81	1%	2%	8%	29%	63%
B82	5%	8%	2%	44%	53%
B91	14%	18%	30%	42%	28%
G12	1%	2%	1%	80%	18%
Région CVL Toutes SER	92%	100%	11%	41%	48%

Conclusions

Ce travail montre que la région CVL se caractérise par des sols majoritairement fortement sensibles à l'export supplémentaire de nutriments occasionné par la pratique de récolte du bois énergie par arbre entier couramment employée pour les coupes de peuplements feuillus. Selon le niveau de sensibilité référence **SensiChimi**, basé sur les concentrations des cinq éléments N, P, K, Ca, Mg dans la couche de sol 0-10 cm, **48% des 412 profils pédologiques de la région CVL** représentés dans notre jeu de données **sont fortement sensibles** et seulement 16% le sont faiblement. Pour mémoire à l'échelle nationale la proportion de sols forestiers fortement sensibles n'est que de 23%. Cette sensibilité est particulièrement marquée pour les éléments Mg et K pour lesquels plus de 50% sols sont fortement sensibles.

Pour faciliter le diagnostic par les forestiers, deux indicateurs ont été développés dans des projets parallèles et testés dans le cadre de ce travail. Le premier, une clef de diagnostic terrain mise au point dans le cadre du projet INSENSE, basée sur 5 critères dont deux effectivement discriminants pour la région (la texture et l'humus), ne semble pas totalement pertinente dans le contexte de la région car trop précautionneuse. En effet si l'indicateur **SensiInsense** donne bien le **même niveau de sensibilité que le niveau SensiChimi dans 51% des 412 profils de la région**, il ne permet pas de conclure dans 18% des cas. Il surestime la sensibilité dans 32 % des cas (dont 4 % de deux niveaux), ce qui aboutit au total à un diagnostic de **68% des sols jugés fortement sensibles** (et même 83% sur les 337 profils avec un niveau déterminé au lieu de 48% selon SensiChimi). De plus, il nécessite une formation avant son utilisation pour bien comprendre les cinq paramètres et savoir utiliser la clef de diagnostic et certains critères restent compliqués à déterminer correctement (humus, texture du sol sur 0-10 cm et profondeur du sol jusqu'à 50cm).

Le second indicateur simplifié **SensiCVL**, conçu dans le cadre du projet DEFIFORBOIS spécifiquement pour le contexte pédologique de la région CVL paraît davantage prometteur. Il est plus simple et facile sur le terrain car basé sur le seul critère de la texture de la couche 0-10 cm. **Il donne le même niveau de sensibilité que l'indicateur SensiChimi dans 66% des cas** (aussi bien sur les 651 profils de la zone d'étude que sur le sous échantillon des 412 profils situés en région CVL). S'il a lui aussi tendance à surestimer la sensibilité, cela concerne moins de cas (20 % des cas dont 1% de deux niveaux). Au total,

l'indicateur classe **53% de sols dans la catégorie des sols fortement sensible** (au lieu de 48% selon SensiChimi). Pour les **classes de sensibilité faible et forte** le diagnostic donné par **SensiCVL est fiable dans 70%** des cas tandis que la fiabilité de la classe intermédiaire (moyenne ou indéterminée) n'est que de 49%. Pour cet indicateur, les erreurs de deux niveaux (surestimation ou sous-estimation) représentent 7% des cas. La comparaison du niveau de sensibilité estimé par l'indicateur SensiCVL par rapport aux niveaux de sensibilité par élément sous-jacent au calcul de la note SensiChimi indique une corrélation bonne à relative bonne pour les éléments Ca, K, Mg et N total mais moins bonne pour P, comme c'est également le cas avec l'indicateur SensiInsense.

Enfin une **carte de sensibilité des sols de la région CVL** basée sur l'indicateur SensiCVL appliqué aux types de sols associés aux unités cartographique du RRP a pu être établie pour 4 des 6 départements de la région. Le département du Loir et Cher (41) n'a malheureusement pu être intégré à cette étude faute de réponses de la part du service propriétaire et détenteur des données et le département d'Eure et Loir avait été, quant à lui, écarté d'emblée car moins forestier. D'après cette carte, on retrouve que **48% de la surface forestière des 4 départements reposent sur des sols fortement sensibles** mais le pourcentage atteint **68% pour le Loiret**. Elle fait bien ressortir les zones où se concentrent les sols les plus sensibles dans le Loiret (au niveau de l'Orléanais et du Nord de la Sologne), dans l'Ouest de l'Indre et Loir et au Sud de l'Indre.

Une telle carte devrait contribuer à faire prendre conscience aux gestionnaires forestiers que pour la moitié des peuplements forestiers de la région, voire plus des trois quart dans certaines sylvoécotones, la pratique de récolte de biomasse avec export des menus bois est fortement déconseillée du fait d'un risque très probable d'impacts sur la fertilité et le fonctionnement du sol. De plus, de nouveaux travaux semblent montrer que le stock initial d'éléments et de carbone n'est pas suffisant pour déterminer l'effet des exports de biomasse sur la fertilité des sols. Des caractéristiques qualitatives, telles que la forme de la matière organique, semblent jouer sur la capacité de rétention du carbone (Ouimet *et al.*, 2023).

L'importance des exports est directement conditionné par le volume total coupé et exporté et le prélèvement ou non des menus bois et des feuilles. Prévoir l'impact d'une exploitation de bois énergie par arbres entier nécessite donc de relativiser l'effet des pertes en fonction du volume et de la modalité de la coupe. Ainsi même sur des sols peu sensibles, une exploitation par arbre entier d'un volume important, peut avoir un impact sur les réserves en nutriments de l'écosystème.

A l'inverse, pour des peuplements sur sols sont moyennement sensibles (40% de la surface forestière de la région) le prélèvement d'une quantité modérée des menus bois est théoriquement acceptable. Elle est envisageable pour des coupes partielles portant sur un faible volume (ouverture de cloisonnement, éclaircie, sanitaire) ou si les petites tiges et une partie des petites branches (menu bois) sont abandonnées dans la parcelle. Des études pour tester l'impact et l'opérabilité de ces différentes modalités de coupe partielle ou de rétention des menus bois ont été menées dans le cadre du projet TAMOBIO.

Les propriétés physico-chimiques des sols déterminent leur richesse en nutriments et carbone, leur capacité à les recycler, à les stocker et les rendre accessibles aux végétaux. Pour prédire si la sensibilité des sols, c'est à dire leur aptitude à supporter plus ou moins les exports de biomasse et nutriments, l'indicateur de sensibilité SensiCVL constitue une approche utile pour la région Centre Val de Loire. Mais n'oublions pas qu'une analyse de sol réalisée par un laboratoire spécialisé s'avère l'option la plus fiable pour bien apprécier la sensibilité d'un sol et évaluer les volumes exportables sans risque.

Remerciements

Nous remercions toutes les personnes propriétaires des données et cartes qui nous ont autorisés à les utiliser pour cette étude (Anne Richer des Forges, Catherine Collet, Cédric Berger, Fabien Carouille, François Charnet, Ingrid Seynave, Manuel Nicolas, Noémie Pousse, Romain Metois, David Froger, Semicha Zidani) ainsi que Rock Ouimet pour son précieux travail de vérification, harmonisation et compilation de la base de donnée Profil-CVL.

Bibliographie

Ademe, Récolte durable de bois pour la production de plaquettes forestières ? 2020. *Col. Clés pour agir*. Ed. Ademe, Angers, 40 p.

Augusto L., Pousse N., Legout A., Seynave I., Jabiol B., Levillain J., 2018. INSENSE : Indicateurs de SENSibilité des Ecosystèmes forestiers soumis à une récolte accrue de biomasse. 262 p.

Augusto L., Achat D., Bakker M., Bernier F., Bert D., Danjon F., Khelifa R., Meredieu C., Trichet P., 2015; Biomass and nutrients in tree root systems—sustainable harvesting of an intensively managed *Pinus pinaster* (Ait.) planted forest, *GCB Bioenergy*, 2015, 7, 231-243.

Conseil régional Centre-Val de Loire, Préfet de région, 2019. Programme régional de la Forêt et du bois Centre-Val de Loire. 82 p.

De Ravignan A., Deconchat M., Malafosse M., Charru M., janvier 2021. Le bois énergie, Etats des lieux, lieux de controverse. Solagro.

Durante S., Augusto L., Achat D.L., Legout A., Brédoire F., Ranger J.; Seynave I., Jabiol B., Pousse N. Diagnosis of forest soil sensitivity to harvesting residues removal, 2019- A transfer study of soil science knowledge to forestry practitioners. *Ecological Indicators* (2019), 104, 512-523, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.05.035>.

Korboulewsky, Nathalie et al., 2020. Développement et durabilité de la filière forêt-bois en région Centre, Projet PSDR DEFIFORBOIS, Centre-Val de Loire, Série Les 4 pages PSDR4. 4p

Korboulewsky N., Bilger I., Bastien J.-C., Cacot E., Colinot A., Dhote J.-F., Dumas Y., Gosselin M., Renaud J.-P., Rosa J., 2022. PSDR4 DEFIFORBOIS - Développement et durabilité de la filière forêt-bois en région Centre-Val de Loire *Innovations Agronomiques* (2022), 86, 345-362

Landmann G., Augusto L., Pousse N., Gosselin M., Cacot E., Deleuze C., Bilger I., Amm A., Bilot N., Boulanger V., Leblanc M., Legout. A., Pitocchi S., Renaud J.-P., Richter C., Saint-Andre L., Schrepfer L., Ulrich E., 2018. Recommandations pour une récolte durable de biomasse forestière pour l'énergie - Focus sur les menus bois et les souches. Angers : ADEME, Paris : ECOFOR, 43 p. + annexe.

INRAE et ONF, 2020. Communiqué de presse 15 juin 2020. Gestion durable des sols en forêt. Lancement de l'application mobile For-Eval



Ouimet R., Korboulewsky N., Bilger I., 2023. Use of soil carbon fractions for improving the diagnosis of soil C and N loss sensitivity to forest biomass harvesting in the Centre-Val de Loire region, France. Fellowship Final Report, 10p.

Richer de Forges A., Feller C., Jamagne M., Arrouays D., 2008. « Perdus dans le triangle des textures ». *Etude et Gestion des Sols*, Association Française pour l'Etude des Sols, 2008, 15, 2, pp97- 111.

Richer de Forges A., 2008. Base de données du Référentiel Régional Pédologique de la région Centre : carte des pédopaysages du Loiret à 1/250 000, en format DoneSol2. INRA InfoSol.

Richer-De-Forges A., Baffet M., Berger C., Coste S., Courbe C., et al., 2014. La cartographie des sols à moyennes échelles en France métropolitaine. *Etude et Gestion des Sols*, Association Française pour l'Etude des Sols, 2014, 21, pp.25-36.

